

## **Az éghajlatkutatás jelentősége és feladatai\***

**Az éghajlatkutatás új korszakába lépett.** Megnövekedtek a társadalmi igények, alapjaiban változtak a technikai lehetőségek. Az új megfigyelési eszközök és a számítógépek alkalmazásával az éghajlat globális elemzése előtt nyílt meg az út. E folyamat valójában nem a közelmúltban kezdődött és nemcsak az éghajlati környezet vizsgálatára vonatkozik. **Az ipari, illetve a tudományos-technikai forradalommal felgyorsult a társadalom alkalmazkodása a természeti feltételekhez. Az elsajátított természeti erők minőségileg és mennyiségileg is nagyságrendekkel nagyobbak, mint korábban. Ezzel párhuzamosan**

**a) – látszólag különös ellentmondásban – „sebezhetőbbé” vált az ember, másszóval az élet e fejlődés során elért magasabb minőségének védelme, megtartása bonyolultabb feladat;**

**b) a nagyobb természeti erőforrások hasznosítása egyben az ember jelentékenyebb beavatkozását is jelenti a természeti folyamatokba.**

Az első problémakör gyökere főképpen arra vezethető vissza, hogy e fejlődés java az utóbbi 100-200 évben viszonylag kedvező és kevésbé változó természeti körülmények között úgy és olyan gyorsan zajlott le, hogy az újabb felfedezések nyomán kialakuló energetikai, technikai stb. folyamatokat, eljárásokat nem vagy alig kellett „adaptívan optimalizálni”, vagyis megváltozott környezeti feltételekre alkalmazva értékelni és alakítani. [ .. ]

A másik problémakör, **a természeti folyamatokba való egyre kiterjedtebb beavatkozásunk, ahhoz a ma sokoldalúan vizsgált kérdéshez vezet: nem módosítottuk vagy módosítjuk-e akarattunk kívül visszafordíthatatlanul a természeti környezetet, vagy annak markáns elemeit úgy, hogy az valamilyen, számunkra ma beláthatatlan vagy alig előrelátható következményekkel járna.** [ .. ]

a) Korunkra jellemző, hogy a társadalmi hatások mértéke a levegőkörnyezet változásainak nyomán is jelentősen megnőtt. [ .. ] A földi éghajlat története alapján minden időszakban az adott éghajlati körülmények jól valószínűsíthető változékonyságával kell számolnunk. A jelenlegi ismereteink szerint prognosztikai következtetések csak igen feltételesek lehetnek. A klimatológiailag várható értékek számításához jelenleg általánosan alapul vett 1931-60-as időszakról kiderült, hogy feltehetően az utóbbi ezer év legkedvezőbb, viszonylag kis változékonyságú periódusa volt (Mason, 1976). **A közelmúlt éghajlatingadozásai nyomán számos ellentmondó értékelés jelent meg. Ezek lehetséges oka az, hogy a légkörben egyidejűleg fennálló különféle mechanizmusok hatásai igen eltérőek lehetnek,** vagyis a légkör olyan összetett rendszer, ahol a különböző tér- és időbeli skálájú folyamatok összefüggő sokasága alakítja ki az egyes elemek átlagos, éghajlati értékeit (Faragó, 1978). Más és más, de külön-külön is többrétű, például a szén-dioxidnak vagy az aeroszoloknak a sugárzási egyenleg kialakításában betöltött szerepe (Mészáros, 1977). **A legújabb kutatások alapján a sokféle hatás eredője is pozitív; az utóbbi 10-12 évre ismét összességében a legutóbbi 100 évben fennálló fölmelegedés a jellemző (Rauner, 1980). Mások különféle okok miatt, a tendencia egyértelműségét nem fogadták el (Madden és Ramanathan, 1980).** Bizonyos vizsgálatok alapján még érthetőbbé válik, miért fordul ma megkülönböztetett figyelemmel az éghajlatkutatás felé a közvélemény: az utóbbi tíz évben jelentékenyen nőtt az éghajlat változékonysága (Hare, 1979), és ennek komoly, néhol katasztrofális társadalmi következményei voltak (Kates, 1979; Czelnai, 1980b).

**b) Az ember az éghajlatot tevékenységével „akaratlanul” is fokozódó mértékben befolyásolhatja (Kellog, 1975).** E hatás három fő területre osztható (Munn és Machta, 1979): a

*\*A cikk kivonata (utólagos kiemelésekkel).*

légkör összetételének módosítása, a „hőszennyezés” és a földfelszín átalakítása. Olyan folyamatokról van itt szó, amelyek a modern ipari és mezőgazdasági fejlődés kísérői, s amelyeknek következményei hosszabb időn át elkerülték a figyelmet. **Többek közül a legismertebbeket, a fosszilis tüzelőanyagok kiterjedt alkalmazása révén növekvő mennyiségű légköri szén-dioxidot, a többféle módon felhasznált és felszabaduló klórfluormetánokat, vagy az emberi tevékenység következtében is keletkező aeroszolokat említhetjük. [ .. ] Az emberiség fejlődése láthatóan olyan szakaszba érkezett, amikor természetátalakító képessége, ereje már kezdi megközelíteni az egyes globális természeti folyamatok nagyságrendjét. [ .. ]**

*Mi az egyetemes és mi az új a jelenlegi szemléletben?*

Az éghajlat, mint ökológiai tényező alapvető sajátosságainak figyelembe vétele már a régi korok embere számára is elengedhetetlen volt. Feltételezhetően a földművelés kialakulásával váltak a megfigyelések céltudatossá. Viszont még ma is csak kevésbé ismerjük azokat a fő mechanizmusokat, amelyek az éghajlatot alakítják, illetve felelősek az éghajlat ingadozásaiért, változásaiért. Ide értjük a kiváltó hatásokat és hatásmechanizmusokat is, tehát azt a folyamatláncot, amely közvetíti a „kezdeti” hatásokat. Az előbbieket általában, az adott rendszer szempontjából, olyan külső tényezőknek tekintik, amelyek főbb tulajdonságai, aránylag hosszú időn át lényegileg változatlanok vagy csak nagyon lassan változnak (Czelnai, 1977). [ .. ]

Melyek a modern éghajlatkutatás fő megkülönböztető jegyei?

Minden kutatómunka lényegi, tartalmi jellemzők kiválasztására irányul, s ennek megfelelően a nem vagy csak kevésbé meghatározó kísérőjelenségek elhanyagolásával és egyszerűsítésekkel jár. [ .. ] Kétségtől bizonyos időskálán egyes hatásoknak meghatározottabb a szerepe, a különféle folyamatok azonban egyrészt átfedik egymást, másrészt olyan közegre – a légkörre – hatnak, amely maga is rendkívül összetett, a külső hatásokra bonyolult, nem-lineáris belső folyamatokkal válaszol. [ .. ]

Többé-kevésbé elfogadottak azok a „külső” tényezők, melyek a  $10^1$ - $10^2$  év nagyságrendű időtartományban az éghajlat szempontjából döntő jelentőségűek. Nevezetesen a napsugárzás (ahogy a légkör külső határát eléri), az óceán mélyebb rétegei, a litoszféra, bioszféra és a krioszféra lassan változó elemei. Az objektum komplex közelítése három területen jelentkezik:

- minden fontosabb összetevő figyelembevétele, beleértve az objektumot alkotó főbb elemeket (szabad légkör, határréteg, óceán aktív felszíne, földfelszín, krioszféra és bioszféra egyes elemei stb.), illetve folyamatokat (impulzus-, hő-, víztranszport, sugárzás, s ezzel kapcsolatban a felhők szerepe, a légkör egyes összetevőinek, mint az ózon, a szén-dioxid vagy az aeroszolok hatása, változása, illetve a konvektív folyamatok, a szabad légkör szubgrid skálájú turbulens folyamatai stb.);
- térbeli kiterjesztés, azaz az éghajlati vizsgálatokban a planetáris skála alkalmazásának szükségessége;
- időbeli komplexitás abban az értelemben, hogy egy-egy időszak viszonylag stabilabb éghajlata is dinamikus egyensúlyi állapotot jelent, tehát számos kisebb igazodási (relaxációs) idővel jellemezhető folyamatot foglal magában. [ .. ]

Az éghajlatkutatás új szemléletének kibontakozásában jelentős szerepe volt a WMO, az ICSU és az UNEP által közösen szervezett 1974-es nemzetközi éghajlati konferenciának (GARP, 1975), amely egyrészt elméleti magját adta a Globális Légkörkutatási Program második célkitűzésének, másrészt megalapozta az Éghajlati Világprogramot. [ .. ]

Az éghajlati konferencia megállapítása szerint **a bonyolult folyamatok elemzésében a numerikus modellezésnek lényegében nincs alternatívája, hiszen ez az egyetlen lehetőség, hogy a klímarendszer elemeinek összefüggéseit, kölcsönhatásait folyamatukban (s ezáltal egyáltalán) feltárhassuk.** A számításba vehető modellek hierarchiája a legelemibb egydimenziós energia-egyensúly modellektől a háromdimenziós, sokoldalúan paraméterezett általános cirkulációs modellekig terjed (*Schneider és Dickinson, 1975*). A magasabb szintű modellek mindenekelőtt az impulzustranszportot írják le egyre részletesebben (tehát egyre kevésbé szűrt, paraméterezett mozgásegyenletekkel). A hierarchia magasabb lépcsőin a modellben megjelennek, többek között a légkör szubgrid skálájú, valamint a földfelszín és az óceán lényeges, paraméterezett folyamatai is. A modelltípusok kapcsolatát szem előtt tartva kijelenthető, hogy az éghajlatmodellezés alapját végsősoron egyértelműen az éghajlatilag fontos fizikai folyamatokkal kibővített általános cirkulációs modellek adják (*Götz, Dévényi és Faragó, 1978*). [ .. ] A fentiekből kitűnik, hogy az éghajlati modellek megoldásakor mindenekelőtt dinamikus egyensúlyi állapotot tartalmazó, aszimptotikus megoldást keresünk. Feltételezzük tehát, hogy a hosszú integrálási folyamat végén, a kezdeti értékezőktől függetlenül, az egyes jellemzők (éghajlati elemek) hosszabb időbeli átlagai már nem változnak.

Az éghajlatmodellezés elsődleges célja természetesen az előrejelzések készítése, a valóság közelítése. [ .. ] Az elsőfajú és ismert (múltbeli és jelenlegi) időszakra vonatkozó éghajlati prognózisok elkészítése révén az elméletileg megszerkesztett és numerikusan realizált modell alapjaiban ellenőrizhető. **A modellek segítségével elemezhető az éghajlati rendszer „érzékenysége” is. Az ilyen „másodfajú” prognózisok (Lorenz, 1975) esetén azt vizsgálják, hogy milyenek lennének a következményei a peremfeltételek vagy a külső „kényszerfeltételek” megváltozásának.** [ .. ] A kutatások keretében, többek között, a légköri CO<sub>2</sub>-mennyiség növekedésének, a napállandó emelkedésének, vagy az antropogén hőszennyezés fokozódó ütemének következményeit vizsgálták. [ .. ]

#### *Társadalmi elvárások; nemzetközi összefogás; időszerű feladatok*

[ .. ] **A mai fejlettebb technikai színvonal ellenére az emberiség rendkívül „sebezhető” még a viszonylag kisebb mértékű éghajlatingadozások által is. Az éghajlat változásai rendkívül sokféleképpen, de különösen a mezőgazdasági tevékenységen keresztül hatnak a társadalomra. Minden erőfeszítés ellenére a tendenciájában növekvő terméshozamok sorában időről-időre óriási ingadozások mutatkoznak (McQuigg, 1979). Az éghajlatingadozások hatásai más területeken is jelentősek; érintik többek között a településtervezési és városfejlesztési tevékenységet, az energiagazdálkodást, a közlekedést.** E sorrend hozzávetőlegesen kifejezi a főbb gazdaság tevékenységi körök éghajlati érzékenységét is (*Czelnai, 1980*).

A 70-es évek első felében megfigyelt és súlyos következményekkel járó éghajlatingadozások nyomán nagy nemzetközi érdeklődés nyilvánult meg a klímakutatás iránt. 1974-ben az Egyesült Nemzetek Szervezetének rendkívüli ülése azzal a kéréssel fordult a Meteorológiai Világszervezethez, hogy vállalkozzon az éghajlati kutatások hatékony nemzetközi összefogására. A kérdéses természeti körülmények közvetlen hatásai nyilvánvalóak voltak, a szükséges teendők megfogalmazása azonban nehéz feladatnak bizonyult. Az addig elért eredmények áttekintésével és a további vizsgálatok fő területeinek kitűzésével már az 1974-es stockholmi éghajlati konferencia is részletesen foglalkozott (GARP, 1975). Az éghajlatkutatók előtt álló főbb kérdések az éghajlat változásaira, ennek természetes és antropogén okaira, társadalmi következményeire, illetve az éghajlat céltudatos módosításának lehetőségeire vonatkoztak (*Boriszenkov, 1976*). [ .. ] Az 1979-es **Éghajlati Világkonferencia** összegezte azokat a teendőket, amelyek alapján a Meteorológiai Világszervezet VIII. Kongresszusa a 29. sz. határozatában formálisan megnyitotta az utat az **Éghajlati Világprogram** tervezése előtt. A program irányítója a Meteorológiai Világszervezet; a kutatási programot a Tudományos Uniók Nemzetközi Tanácsával együttesen

szervezi; az éghajlati és az éghajlatra gyakorolt hatások vizsgálatait pedig az ENSZ Környezetvédelmi Programja koordinálja. [ .. ]

*A hazai kutató és szervező munka adottságai és lehetőségei  
az Éghajlati Világprogrammal összefüggésben*

[ .. ] **Jelentős hazai eredmények születtek már eddig is a levegő összetételének változásával, az antropogén levegőszennyezés emissziójának és transzmissziójával kapcsolatban. Ugyanakkor e folyamatok éghajlati következményeinek, vagy az éghajlatingadozások társadalmi hatásainak elemzése terén a külföldi, általánosabb érvényű kutatásokon kívül nélkülözhetetlenek a helyi vizsgálatok is.** Az éghajlatkutatási alprogram szempontjából alapvető jelentőségű az éghajlati rendszer összetevőinek és folyamatainak fenomenológiai leírása. A magyar klímakutatók eredményei e tekintetben a leggazdagabbak. Újabb követelményeket támasztanak az 1981 őszen kezdődő Alpi Kísérlet (ALPEX) célkitűzései (GARP, 1980). Az éghajlatingadozásoknak a műszeres megfigyelési sorozatokon alapuló statisztikai vizsgálatával is többen foglalkoztak. A hazai paleoklimatológiai kutatásokról nemrég kitűnő összefoglaló tanulmány jelent meg (Kordos, 1979). Az éghajlat numerikus modellezéséhez fontos, néhány fizikai, kémiai folyamat (alsó határreteg folyamatai, sugárzási, levegőkémiai folyamatok, levegőszennyező anyagok felszabadulása és terjedése stb.) vizsgálatában eddig elért eredmények továbbfejlesztése látszik biztosíthatónak. A lehetőségek számbavételével a Meteorológiai Tudományos Bizottság, a GARP\* Albizottság ajánlásai nyomán, már korábban is igen behatóan foglalkozott (-, 1978). Az akkor megfogalmazott főbb feladatok ma is időszerűek.

Mindezek alapján a Meteorológiai Tudományos Bizottság, illetve annak Éghajlati Világprogram Albizottsága\* előtt az a feladat áll, hogy részletesebben áttekintse a hazai klímakutatás eddigi eredményeit, a témakör lehetőségeit és pontosabban megfogalmazza a jövő célkitűzéseit.

IRODALOM

- Ambrózy P. et al., 1977: A hazai éghajlatkutatás és a hosszútávú előrejelzések helyzete. Összefoglaló tanulmány. MTA, Meteorológiai Tudományos Bizottság.
- Boriszenkov, E. P., 1976: O klimate i zadacsah PIGAP-KLIMAT. Meteorologia i gidrologia. 1., 3-15.
- Chervon, R. M., Schneider S. H., 1976: On determining the statistical significance of climate experiments with general circulation models. J. Atmos. Sci. pp. 405-412.
- Czelnai R., 1977: Légköri folyamat-rendszerek modellezése. MTA X. Oszt. Közl. 1-2., 31-51.
- Czelnai R., 1980: A meteorológia eszközei és módszerei. OMSZ. Budapest
- Czelnai R., 1980b: Climate and society: Great Plain of the Danube Basin. Proc. Workshop, IIASA, Laxenburg.
- Faragó T., 1978: Az éghajlatmodellezés alapjai. Előadás a Meteorológiai Tudományos Napokon. Az OMSZ Hiv. Kiadv. XLVIII., 151-161, 1979.
- Flohn, H., 1977: Climate and energy. Climate change 1., pp. 5-20.
- GARP, 1975: The physical basis of climate and climate modelling. GARP. P.S. No. 16.
- GARP, 1980: The ALPINE Experiment (ALPEX). Experiment design proposal. Geneva.
- Gerasimov, I. P., 1979: Climates of past geological epochs. World Climate Conf., WMO – No. 537, pp. 88-111.
- Götz G., Dévényi D., Faragó T., 1978: Éghajlatmodellezés és a szubgrid skálájú folyamatok. Kézirat. OMSZ, Budapest
- Hare, F. K., 1979: Climatic variation and variability: empirical evidence from meteorological and other sources. World Climate Conf., WMO No. 537, pp. 682-691.
- Hasselmann, K., 1979: Some comments on the design of model response experiments for multitime-scales systems. In: GARP P.S. No. 22, 1037-1049.
- Hunt, B. G., 1979: The effect of past variations of the Earth's rotation rate on climate. NATURE 20, pp. 188-191.
- Kates, R. W., 1979: Climate and society: Lessons from past events. World Climate Conf., WMO – No. 537, pp. 682-691.
- Kellogg, W. W., 1975: Effects of human activities on global climate. WMO Techn. Note, No. 156.
- Kordos L., 1979: A magyarországi paleoklimatológiai kutatások módszerei és eredményei. OMSZ Hiv. Kiadv. L., Budapest
- Koppány Gy., 1980: Éghajlatváltozások modellezése. Élet és Tudomány. 166-168.
- Laurmann, J. A., Gates, W. L., 1977: Statistical considerations in the evaluation of climate experiments with atmospheric general circ. models. J. Atmos. Sci. 1187-1198
- Leith, C. E., 1971: Atmospheric predictability and two-dimensional turbulence. J. Atmos. Sci., pp. 145-161.
- Lorenz, E. N., 1968: Climate determinism. Meteor. Monographs. 30.
- Lorenz, E. N., 1973: On the existence of extended range predictability. J. Atmos. Meteor. pp. 543-546.
- Lorenz, E. N., 1975: Climatic predictability. GARP P. S. No. 16, WMO, Geneva, pp. 132-136.
- Madden, R. A., Ramanathan, V., 1980: Detecting climate change due to increasing carbon dioxide. Science, 4458., pp. 763-767.
- Mason, B. J., 1976: The nature and prediction of climate changes. Endeavour, 125., 51-57.
- McQuigg, J. D., 1979: Climatic variability and agriculture in the temperate regions. World Climate Conf., WMO – No. 537, pp. 406-425..
- Mészáros E., 1977: A levegőkémia alapjai. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Munn, R. E., Machta, L., 1979: Human activities that affect climate. World Climate Conf., WMO - No. 537, pp. 170-209.
- Neumann, J., von, 1955: Some remarks on the problem of forecasting climatic fluctuations. In "Dynamics of climate", ed. R. L. Pfeffer, Pergamon Press.
- Pécze Gy., 1979: Éghajlat. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Rauiner Ju. L., 1980: Genesiz i prognoz szovremennova klímata. Izv. An. SzSzSzR, sec. Geograficeszkaja, 5. 161-168.
- Schneider, H. S., Dickinson, R. E., 1975: Climate modelling methodology. In GARP P.S. No. 16., pp. 142-147.
- Schneider, H. S., 1977: Climate change and the world predicament. Climate Change 1., pp. 21-43.
- Simpson, G. C., 1927: Past climates. Quart. Journal of Royal Met. Soc., 223., pp. 213-232.
- Smagorinsky, J., 1969: Problems and promises of deterministic extended range forecasting. Bull. Amer. Meteor. Soc. pp. 286-311.
- Williams, J., Häfele, W., Sassini, W., 1979: Energy and climate. World Climate Conf., WMO – No. 537, pp. 267-289.
- WMO, 1978: World Climate Programme. WMO Bulletin, 3., pp. 203-205.
- WMO, 1980: Outline plan and basis for the World Climate Programme 1980-83, WMO No. 540.
- , 1978: Szempontok a magyar tevékenységhez a klíma modellezés területén. (Előkészület a GARP Klímadinamikai Dekádjára), MTA-MTB GARP-Albiz.

\* A GARP Albizottság és az Éghajlati Világprogram Albizottság titkára a jelen cikk szerzője volt.